污泥热碱液对干旱胁迫下小青菜生长的缓解机制

白　炬[1,2]，　刘晓林[1,2,3]，　李　申[1,2]，　梁哲铭[1,2]，
胥子航[1,2]，　王永亮[1,2]，　杨治平[1,2]

（1. 山西农业大学生态环境产业技术研究院，农业农村部盐碱土改良与利用重点实验室（学科群），山西 太原 030031；2. 土壤环境与养分资源山西省重点实验室，山西 太原　030031；3. 山西大学生命科学学院，山西 太原　030006）

摘　要：近年来，为实现城市生活污泥的资源化利用，通过碱热水解技术制成的污泥热碱液被广泛关注。干旱是自然界中主要非生物胁迫之一，严重限制了作物的生长发育。为了改善干旱胁迫对蔬菜作物的影响，同时实现污泥资源化利用，本研究以小青菜（*Brassica chinensis*）为材料，通过盆栽试验设置4个水分梯度模拟不同干旱程度，在不同干旱程度下分别冲施等氮量的热碱液和尿素溶液，探讨热碱液对叶菜抵抗干旱胁迫的作用机制。结果表明：干旱胁迫下，经热碱液处理后，小青菜根长密度、根表面积密度和根体积密度均显著增加，进而促进对水分和氮素营养的吸收，提高叶片相对含水量，维持光合作用；冗余分析表明热碱液的施用主要提高过氧化氢酶活性和叶片相对含水量降低干旱胁迫对小青菜生长的负面影响。综上所述，将污泥热碱液应用到蔬菜生产中可缓解干旱胁迫对叶菜造成的生长抑制，为干旱地区蔬菜生产提供了策略，也为有效无害化、资源化利用城市生活污泥提供了一种新途径。

关键词：污泥热碱液；干旱胁迫；抗氧化酶活性；冗余分析；污泥资源化利用

干旱是限制植物生长发育的重要环境胁迫之一。山西省地处黄土高原东部边缘地带，作物面积占总面积的60%，但全省80%的地区水资源极其匮乏[1-2]。蔬菜根系较浅，对水分需求较高。当土壤水分亏缺时，植物根系的生理活动首先受到影响，进而影响整个植株，使植物体内积累大量活性氧（ROS），阻碍细胞正常代谢，从而造成生长缓慢、品质以及产量降低的现象，严重时会导致死亡[3]。

生活污泥中含有丰富的无机元素和有机营养，其中蛋白质含量达50%[4]，这些营养物质不仅可以提高土壤肥力，还可被植物吸收利用进而促进自身生长，同时有利于植物应对逆境胁迫，因此可将其运用于农业生产[5-6]，但是若将其直接农用，污泥中含有的大量病原菌、抗生素和重金属等多种有毒污染物会对农作物生长环境造成不利影响。目前，有研究报道，通过碱热水解技术制成的污泥热碱液（以下简称热碱液），不仅能消除污泥中有机污染物和重金属的污染，还可高效提取污泥中以蛋白质和氨基酸存在的含氮化合物[7-9]。研究表明，有机态氮对植物抵御逆境有重要调节作用，干旱胁迫下外源氨基酸可促进渗透调节，提高植物细胞酶促防御系统的活性，进而增强作物抗旱性[10]。因此本研究假设热碱液中的氨基酸类含氮化合物被干旱环境下的植物吸收利用后可调节体内生理生化过程，促进地下根系生长，增强地上部光合作用，分泌渗透调节物质，对提高植物的抗旱性具有一定的作用。

目前，已有研究表明热碱液在促进植物生长发育中发挥重要作用，但其对作物抗旱性的影响机理研究极为匮乏。因此，本试验以小青菜为研究对象，在不同程度干旱胁迫下，探讨热碱液在小青菜生长过程中对干旱胁迫的响应机理，为污泥的资源化利用提供新的见解和策略。

收稿日期：2023-07-20；　**修订日期：**2023-10-10
基金项目：山西省科技重大专项计划项目（202201140601028）；山西省重点研发计划项目（202202140601010）；山西农业大学“特”“优”农业高质量发展科技支撑工程（TYGC-34）；山西农业大学校企合作项目（2023HX006）
作者简介：白炬（1994-），男，博士，助理研究员，主要从事作物施肥与新型肥料研发研究. E-mail: baiju@sxau.edu.cn
通讯作者：杨治平. E-mail: yzpsx0208@163.com

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试小青菜(*Brassica chinensis*)品种为夏多美。供试土壤为砂质壤土,土壤有机质14.9 g·kg^{-1}、全氮0.1 g·kg^{-1}、有效磷8.6 mg·kg^{-1}、速效钾136.0 mg·kg^{-1}、pH 7.9、田间持水量19.6%。供试氮、磷、钾肥分别为尿素(N46%)、过磷酸钙($P_2O_5$12%)、硫酸钾(K_2O52%)。试验所用聚丙烯花盆规格为高15 cm、内径21.5 cm。本试验委托山西晋联环境科技有限公司采用碱性热水解工艺,加入生石灰提取生活污泥中有机含氮化合物,制成富含钙的热碱液,其主要成分如表1,参照有关标准GB38400-2019与NY1429-2010,热碱液中重金属含量远低于肥料中有毒有害物质的限量要求。

表1 热碱液成分

Tab. 1 Compositions of the alkaline thermal hydrolysis liquid

因子	含量	因子	含量
钙/(g·L^{-1})	55.3±3.7	砷/(mg·L^{-1})	1.8±0.1
全氮/(g·kg^{-1})	40.0±0.2	铅/(mg·L^{-1})	3.0±0.1
多肽/(g·L^{-1})	116.7±12.1	铬/(mg·L^{-1})	1.8±0.1
蛋白质/(g·L^{-1})	35.7±1.6	汞/(μg·L^{-1})	66.2±5.9
游离氨基酸/(g·L^{-1})	54.7±5.2	镉/(μg·L^{-1})	12.3±3.8

1.2 试验设计

2022年8月26日至2022年10月20日,盆栽试验于山西省农业科学院创新基地连栋温室(37°46′40″N,112°34′43″E)开展。试验按照农业干旱等级(GB/T32136-2015)设置4种水分条件:正常供水(ND),土壤含水量保持在田间持水量的70%~80%;轻度干旱(LD),土壤含水量保持在田间持水量的50%~60%;中度干旱(MD),土壤含水量保持在田间持水量的40%~50%;重度干旱(SD),土壤含水量保持在田间持水量的30%~40%,于每天17:00—18:00采用称重法维持土壤含水量。在每种水分条件下分别追施尿素溶液(U)和热碱液(W),两因素组合共8个处理,整个生育期共追施6次,分别在冲施两次后的第3 d对小青菜进行破坏性取样,代表胁迫前期、中期和后期,共取样3次,每次取样6盆,共144盆。盆栽试验每盆装土2.5 kg,基肥为氮肥(N)120 mg·kg^{-1}干土、磷肥(P_2O_5)100 mg·kg^{-1}干土,钾肥(K_2O)150 mg·kg^{-1}干土,随土装盆一次性基施,每盆定苗3株后,每隔7 d追施N 4.3 mg·kg^{-1}干土,保持追施的尿素溶液和热碱液等体积,且N含量一致。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 生物量和氮素吸收量 取样后测定小青菜地上部鲜重,每盆各留一株于105 ℃杀青半小时后,75 ℃烘干至恒重,用于测定植株全氮[11],计算氮素吸收量。

1.3.2 光合参数 采用Li-6400型便携式光合作用测定系统分别在冲施两次后的第2 d晴天上午9:30—11:00,选取小青菜中部第3~5片生长完整的功能叶,测定叶片净光合速率(*Pn*)、气孔导度(*Gs*)、胞间CO_2浓度(*Ci*)和蒸腾速率(*Tr*)。

1.3.3 叶片生理指标 取小青菜中部第3~5片功能叶,参照李合生[12]的方法采用饱和称重法测定叶片相对含水量(RWC),参照高俊凤[13]的方法采用蒽酮比色法测定可溶性糖含量,采用硫代巴比妥酸显色法测定丙二醛(MDA)含量,采用酸性茚三酮法测定脯氨酸(Pro)含量,采用氮蓝四唑法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性,采用愈创木酚法测定过氧化物酶(POD)活性,采用过氧化氢还原法测定过氧化氢酶(CAT)活性。

1.3.4 根系指标 采样当天参照高俊凤[13]的方法采用氯化三苯基四氮唑(TTC)法测定根系活力。采用WinRHIZO根系分析系统测定根长、根表面积及根体积等形态参数,计算根长密度、根表面积密度和根体积密度。

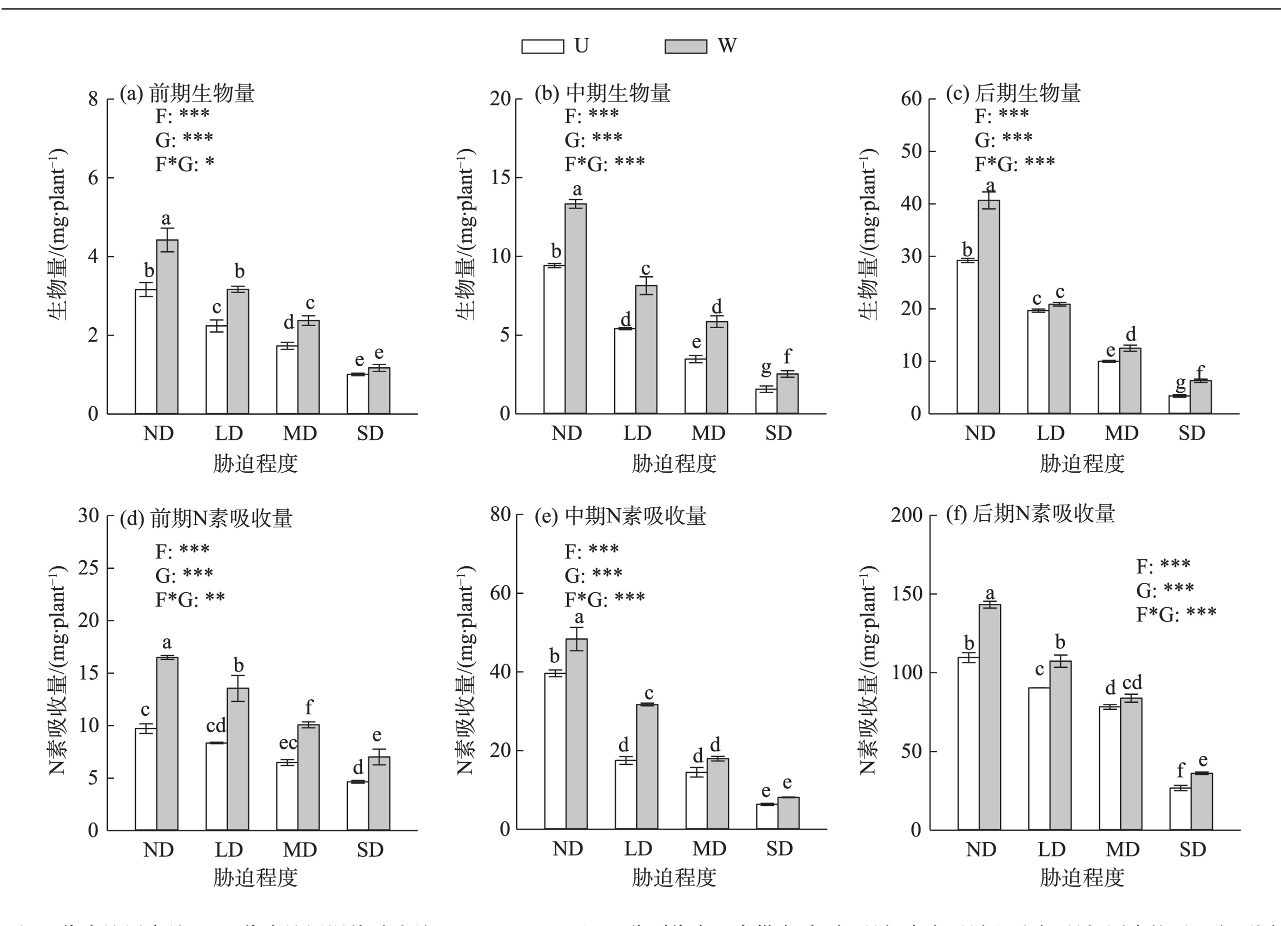
1.4 数据分析

采用SPSS 23.0软件进行数据统计分析,用最小显著差法(LSD)检验试验数据的差异显著性水平($P<0.05$),用Canoco 5软件进行冗余分析(RDA),SigmaPlot 12.0进行制图。

2 结果与分析

2.1 污泥热碱液对干旱胁迫下小青菜生物量和氮素吸收量的影响

方差分析表明,干旱等级和施肥元素在不同胁迫时期对小青菜生物量和氮素吸收量均达到显著水平,且二者在不同胁迫时期均有显著交互作用(图1)。与正常供水处理相比,不同程度干旱胁迫下,小青菜生物量和氮素吸收量在不同胁迫时期均



注：U代表施尿素处理，W代表施污泥热碱液处理；ND、LD、MD和SD分别代表正常供水、轻度干旱、中度干旱和重度干旱；图中柱子上方不同小写字母表示不同处理差异显著（$P<0.05$）；F代表施肥元素，G代表干旱等级，F*G代表施肥元素和干旱等级间的交互效应，*、**和***分别表示差异在$P<0.05$、$P<0.01$和$P<0.001$达到显著水平，ns表示差异不显著（$P>0.05$）。下同。

图1　不同处理下小青菜生物量和氮素吸收量

Fig. 1　Biomass and nitrogen uptake in *Brassica chinensis* under different treatments

显著下降，其中生物量在尿素处理中下降29.2%~88.4%，热碱液处理中下降28.4%~84.6%；氮素吸收量在尿素处理中下降14.2%~84.0%，热碱液处理中下降17.8%~83.3%。在同一水分条件下，与尿素处理相比，热碱液处理的生物量和氮素吸收量显著增加，其中生物量分别在胁迫前期、中期和后期增加16.4%~41.5%、50.4%~68.7%和6.2%~84.9%，氮素吸收量分别增加51.0%~62.6%、23.8%~81.0%和7.0%~35.0%。说明热碱液的施用可提高干旱胁迫下小青菜生物量和氮素吸收量。

2.2　污泥热碱液对干旱胁迫下小青菜光合特性的影响

方差分析表明，干旱等级和施肥元素在不同胁迫时期对小青菜*Pn*、*Gs*、*Ci*和*Tr*的影响均达到显著水平，二者在不同胁迫时期对*Pn*均有显著交互作用，在胁迫前期对*Gs*有显著交互作用，在胁迫前期和中期对*Tr*有显著交互作用（图2）。与正常供水处理相比，不同程度干旱胁迫下，小青菜*Pn*、*Gs*、*Ci*和*Tr*在不同胁迫时期均显著下降。*Pn*、*Gs*、*Ci*和*Tr*在尿素处理中下降0.3%~67.6%、1.83%~83.8%、11.3%~54.7%和7.0%~72.6%，在热碱液处理中下降4.2%~57.6%、25.1%~78.2%、11.1%~43.6%和7.2%~72.3%。在同一水分条件下，与尿素处理相比，热碱液处理的小青菜叶片光合参数均显著增加，其中*Pn*分别在胁迫前期、中期和后期增加28.5%~117.8%、2.1%~106.3%和13.5%~24.4%；*Gs*分别增加13.4%~71.1%、45.7%~212.5%和74.9%~79.1%；*Ci*分别增加13.7%~16.6%、25.6%~40.0%和5.3%~52.0%；*Tr*分别增加1.9%~95.9%、24.4%~82.0%和0.2%~51.6%。说明热碱液的施用可提高干旱胁迫下小青菜光合特性。

2.3　污泥热碱液对干旱胁迫下小青菜渗透调节物质的影响

方差分析表明，干旱等级在不同胁迫时期对小青菜叶片渗透调节物质的影响均达到显著水平，施

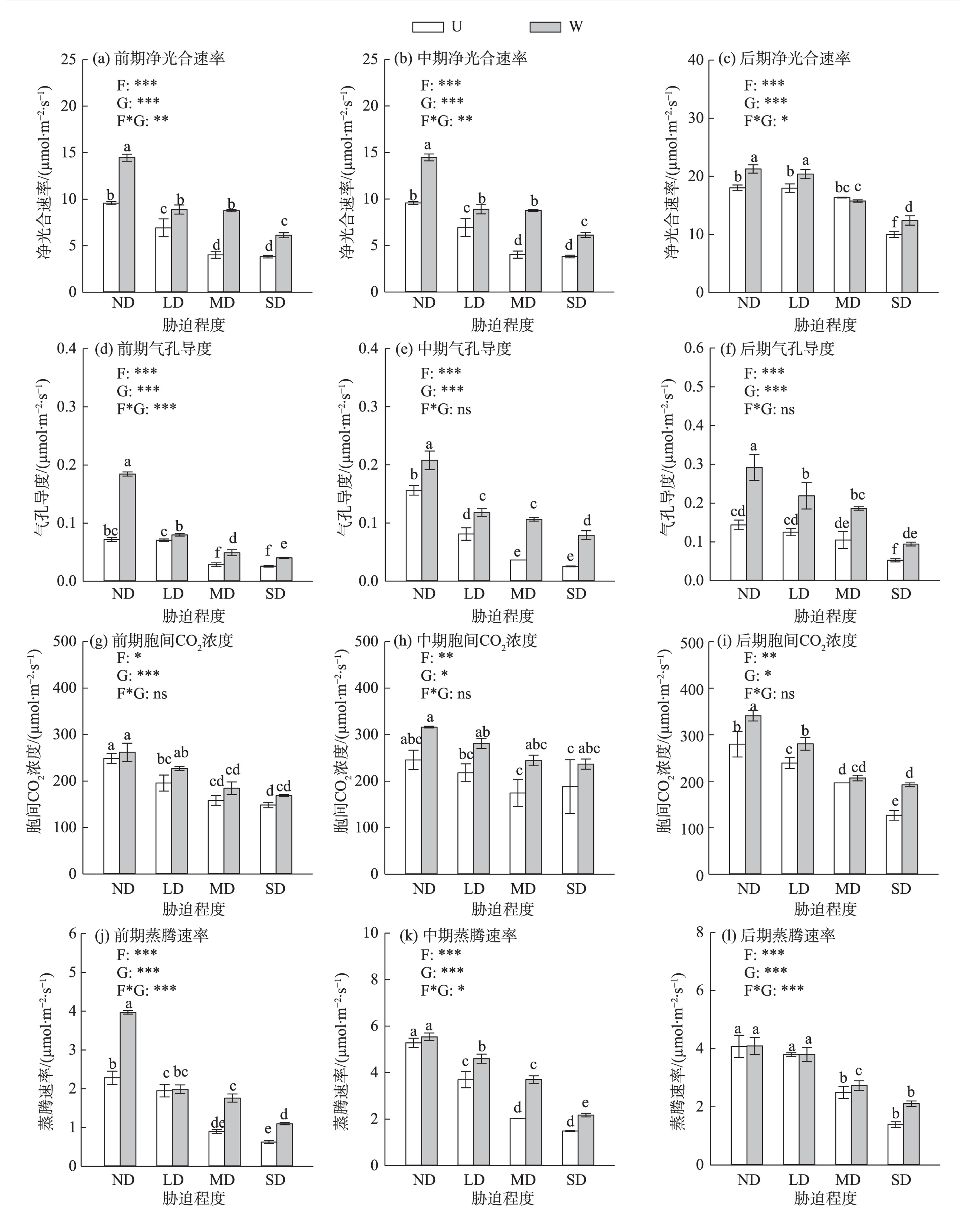


图2　不同处理下小青菜叶片净光合速率、气孔导度、胞间CO_2浓度和蒸腾速率

Fig. 2　*Pn*, *Gs*, *Ci* and *Tr* in leaves of *Brassica chinensis* under different treatments

肥元素在不同胁迫时期对Pro含量的影响均达到显著水平,在胁迫中期和后期对可溶性糖含量的影响达到显著水平,二者在胁迫前期和中期对Pro含量的影响具有显著交互作用,在胁迫中期和后期对可溶性糖含量的影响具有显著交互作用(图3)。与正常供水处理相比,不同程度干旱胁迫下,小青菜叶

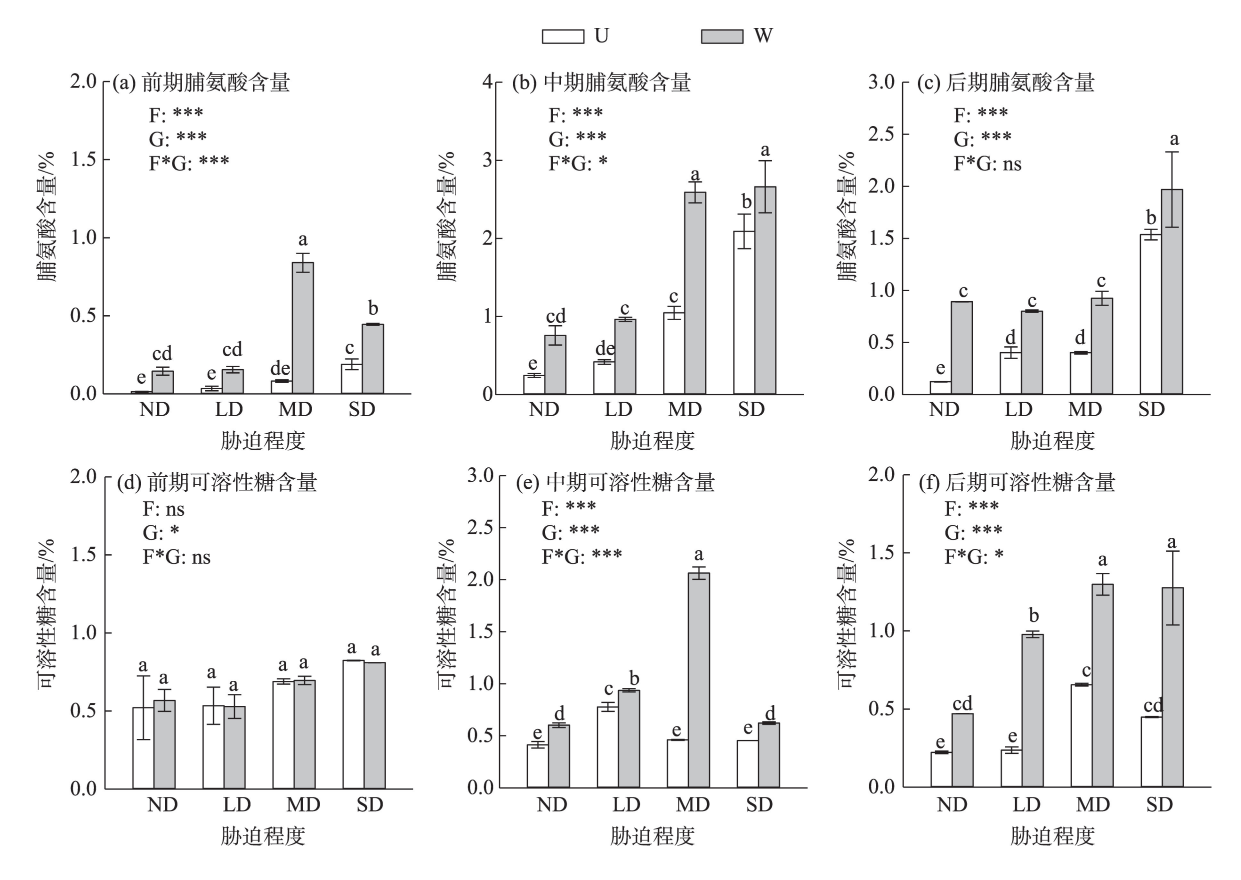


图3 不同处理下小青菜叶片脯氨酸和可溶性糖含量

Fig. 3 Contents of Pro and soluble sugars in *Brassica chinensis* leaves under different treatments

片中Pro和可溶性糖含量在不同胁迫时期均显著增加。Pro在尿素处理中增加69.9%~1260.5%,热碱液处理中增加3.8%~478.9%;可溶性糖在尿素处理中增加2.4%~195.6%,热碱液处理中增加3.4%~338.7%。在同一水分条件下,与尿素处理相比,热碱液处理进一步促进了两者的积累,其中Pro分别在胁迫前期、中期和后期显著增加135.0%~923.5%、27.4%~147.6%和28.2%~130.2%;可溶性糖在胁迫前期无显著变化,在中期和后期分别显著增加20.5%~347.5%和98.0%~313.5%。

2.4 污泥热碱液对干旱胁迫下小青菜抗氧化酶活性及丙二醛的影响

方差分析表明,干旱等级在不同胁迫时期对小青菜叶片抗氧化酶活性的影响均达到显著水平,施肥元素在不同胁迫时期对CAT活性的影响均达到显著水平,在胁迫前期和后期对SOD活性的影响达到显著水平,在胁迫前期对POD活性的影响达到显著水平;二者在胁迫后期对CAT活性有显著交互作用,在胁迫前期对SOD和POD活性有显著交互作用(图4)。与正常供水处理相比,不同程度干旱胁迫下,小青菜叶片中CAT、SOD和POD活性在不同胁迫时期均显著提高。CAT、SOD和POD活性在尿素处理中分别增加1.2%~89.6%、8.2%~165.7%和28.2%~231.2%;在热碱液处理中分别增加13.4%~62.7%、1.8%~88.6%和5.8%~245.6%。热碱液处理后小青菜叶片中抗氧化酶活性表现出不同的变化趋势,在同一水分条件下,与尿素处理相比,热碱液处理的小青菜叶片中CAT活性均显著提高,分别在胁迫前期、中期和后期提高1.8%~25.4%、29.1%~35.0%和13.2%~45.7%;POD活性在胁迫前期的重度干旱下显著提高117.7%;SOD活性均在整个生育期均表现出降低的趋势,在胁迫前期和后期分别显著降低23.0%~60.5%和4.3%~16.3%。

MDA是植物受到逆境胁迫时膜脂过氧化的产物之一,其含量代表植物受到逆境伤害的程度。方差分析表明,干旱等级和施肥元素在不同胁迫时期对小青菜叶片中MDA含量的影响均达到显著水平,且二者在胁迫后期有显著交互作用(图5)。与正常供水处理相比,不同程度干旱胁迫下,小青菜叶片MDA含量在不同胁迫时期均显著增加。尿素处理中增加6.1%~73.2%,热碱液处理中增加3.7%~77.1%。在同一水分条件下,与尿素处理相比,热碱

图4　不同处理下小青菜叶片CAT活性、SOD活性及POD活性

Fig. 4　CAT, SOD and POD activitys in *Brassica chinensis* leaves under different treatments

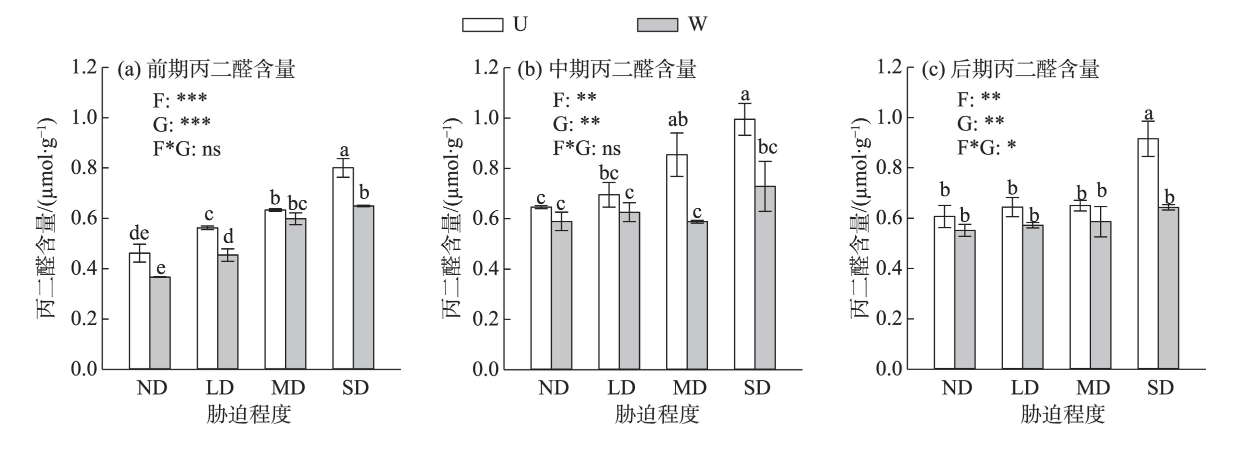


图5　不同处理下小青菜叶片MDA含量

Fig. 5　Content of MDA in *Brassica chinensis* leaves under different treatments

液处理减少了MDA在叶片中的积累,分别在胁迫前期、中期和后期显著减少5.6%~19.2%、9.9%~31.2%和9.9%~29.8%。说明热碱液的施用可缓解干旱胁迫对小青菜的生长抑制。

2.5 污泥热碱液对干旱胁迫下小青菜叶片相对含水量的影响

叶片相对含水量(RWC)可以反映植物在胁迫条件下体内的水分状况和保持水分的能力[14]。方差分析表明,干旱等级和施肥元素在不同胁迫时期对小青菜叶片RWC的影响均达到显著水平,且二者在胁迫前期和中期有显著交互作用(图6)。与正常供水处理相比,不同程度干旱胁迫下,小青菜叶片RWC在不同胁迫时期均显著下降。尿素处理中下降2.3%~24.9%,热碱液处理中下降2.3%~24.6%。在同一水分条件下,与尿素处理相比,热碱液处理后小青菜叶片RWC显著增加,分别在胁迫前期、中期和后期增加13.7%~30.2%、1.6%~17.4%和7.9%~36.7%。

2.6 污泥热碱液对干旱胁迫下小青菜根系的影响

方差分析表明,干旱等级和施肥元素在不同胁迫时期对小青菜根长密度、根表面积密度、根体积密度和根系活力的影响均达到显著水平,且二者在不同胁迫时期对根系形态均有显著交互作用,在胁迫中期对根系活力有显著交互作用(图7)。与正常供水处理相比,不同程度干旱胁迫下,小青菜根长密度、根表面积密度和根体积密度在不同胁迫时期均显著下降。根长密度、根表面积密度和根体积密度在尿素处理中分别下降26.6%~90.3%、1.8%~85.8%和6.3%~91.0%,在热碱液处理中分别下降39.3%~87.5%、6.8%~81.2%和32.2%~84.5%。在同一水分条件下,与尿素处理相比,热碱液处理的根长密度、根表面积密度和根体积密度在不同胁迫时期均显著增加,其中根长密度在胁迫前期、中期和后期分别增加2.4%~64.7%、7.4%~59.5%和0.9%~91.8%,根表面积密度分别增加6.7%~27.6%、1.8%~67.3%和30.5%~206.3%,根体积密度分别增加6.3%~50.0%、22.2%~75.7%和22.8%~240.4%。

与正常供水处理相比,在胁迫前期和中期,不同程度干旱胁迫提高了小青菜根系活力,尿素处理和热碱液处理分别提高9.4%~61.6%和11.9%~91.3%;在胁迫后期,小青菜根系活力随干旱程度的增加显著下降,尿素处理和热碱液处理分别下降1.5%~42.9%和17.5%~36.3%。在同一水分条件下,与尿素处理相比,热碱液处理的根系活力显著提高,分别在胁迫前期、中期和后期提高86.8%~102.5%、28.8%~118.4%和3.8%~48.4%。说明热碱液的施用可改善干旱胁迫下小青菜地下部生长。

2.7 小青菜逆境相关指标与生长指标的冗余分析

在不同程度干旱胁迫下,以小青菜第3个时期为代表,对小青菜的逆境相关指标与生长指标进行RDA分析(图8,表2)。

由表2所示,在轻度和中度胁迫下,CAT是施入热碱液后影响小青菜生长的主导因素($P<0.01$),分别解释了小青菜生长的61.8%和52.5%,且与小青菜生长指标呈正相关(图8);在重度胁迫下,RWC是施入热碱液后影响小青菜生长的主导因素($P<0.05$),解释了小青菜生长的78.8%,与小青菜各项生长指标呈正相关(图8)。

3 讨 论

根系作为植物吸收水分的主要部位,也是最先

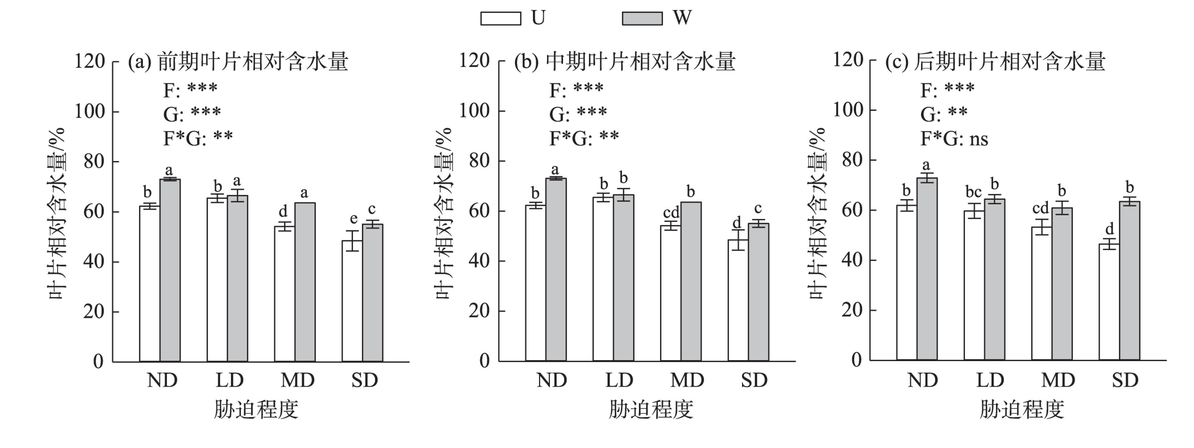


图6 不同处理下小青菜叶片相对含水量

Fig. 6 Leaf RWC in *Brassica chinensis* leaves under different treatments

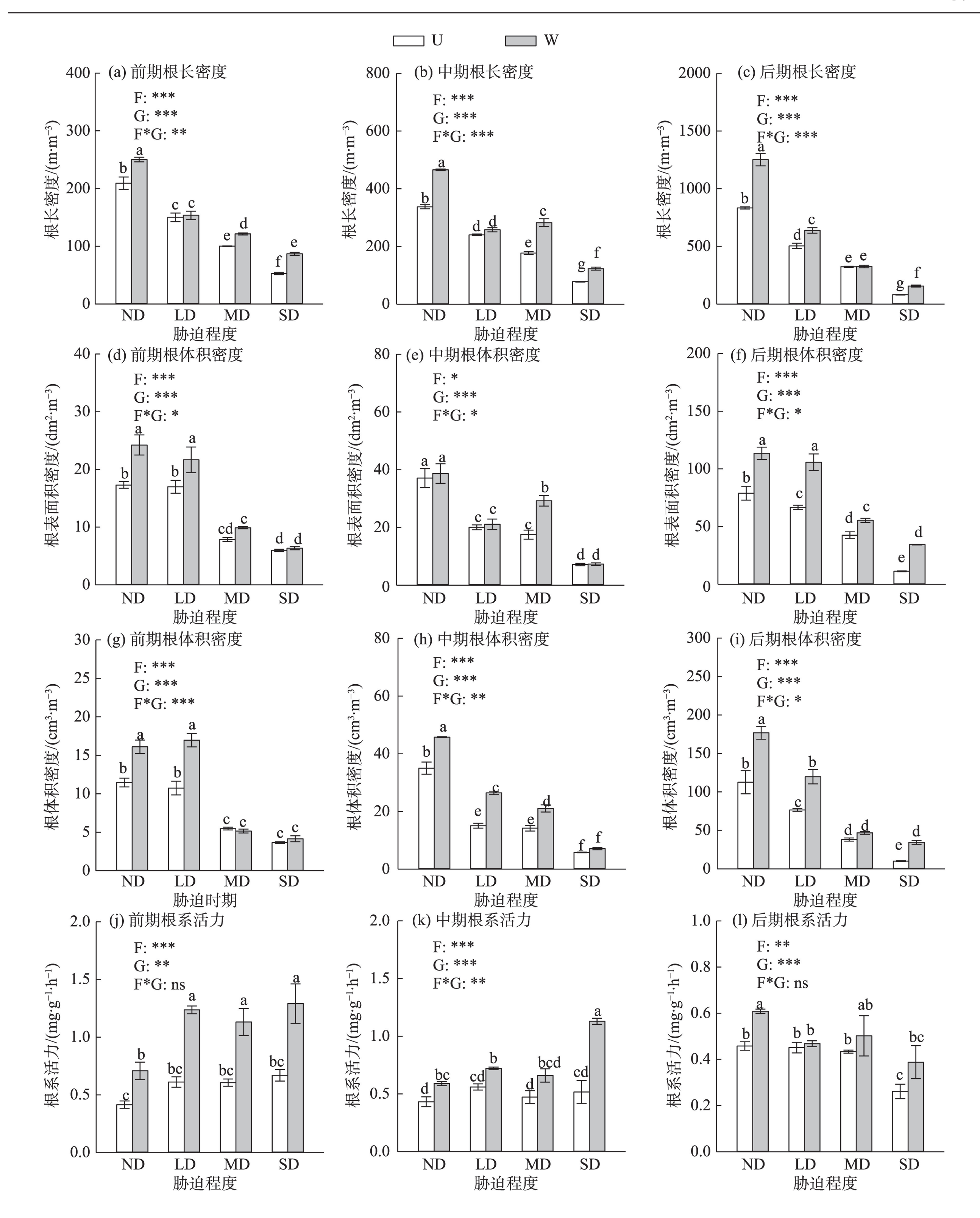
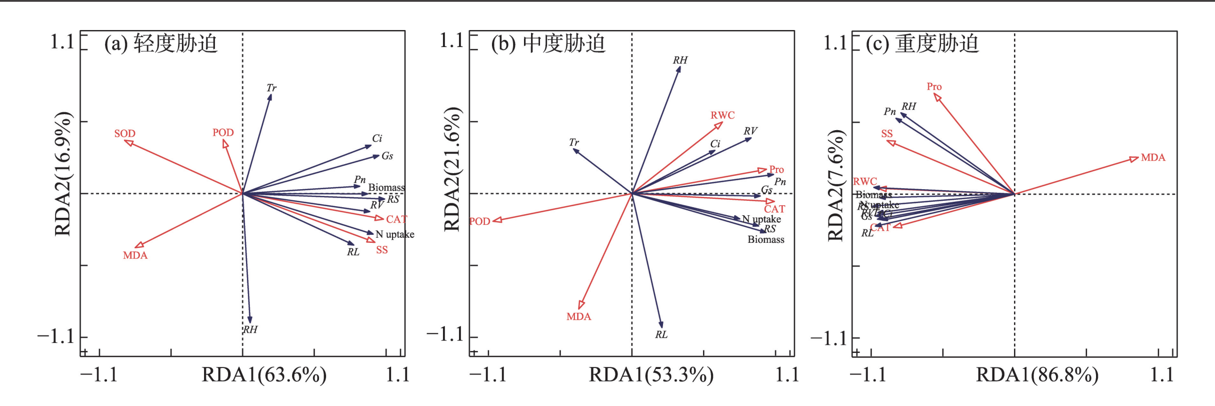


图7　不同处理下小青菜根长密度、根表面积密度、根体积密度及根系活力

Fig. 7　Root length density , root surface area density, root volume density and root vitality of *Brassica chinensis* under different treatments

感受到土壤水分亏缺的部位。干旱胁迫下,植物根系可通过调整自身形态结构和生理生化特征适应逆境[15]。本研究结果表明,小青菜受到干旱胁迫后,整个生育期中其根长密度、根表面积密度和根体积密度显著低于正常供水处理,而根系活力在胁迫前期和中期呈相反的变化趋势,均高于正常供水



注：Biomass为生物量；N uptake为氮素吸收量；*Pn*为净光合速率；*Gs*为气孔导度；*Ci*为胞间CO_2浓度；*Tr*为蒸腾速率；*RL*为根长密度；*RS*为根表面积密度；*RV*为根体积密度；*RH*为根系活力；CAT为过氧化氢酶；POD为过氧化物酶；SOD为超氧化物歧化酶；Pro为脯氨酸；SS为可溶性糖；RWC为叶片相对含水量；MDA为丙二醛。下同。

图8 小青菜逆境相关指标与生长指标的冗余分析

Fig. 8 Redundant analysis of stress-related indicators and growth indicators of *Brassica chinensis*

表2 小青菜逆境相关指标对生长指标的解释率和显著性检验

Tab. 2 Interpretation rate and significance test of *Brassica chinensis* stress-related indicators and growth indicators

逆境相关指标	轻度胁迫(LD)			中度胁迫(MD)			重度胁迫(SD)		
	Explains/%	*F*	*P*	*Explain/%*	*F*	*P*	*Explain/%*	*F*	*P*
CAT	61.8	6.5	0.008	52.5	4.4	0.006	3.6	<0.1	1
MDA	10	1.1	0.442	18	1.8	0.17	7.6	1.7	0.23
POD	12.8	1.7	0.256	8.9	1.6	0.398	–	–	–
SS	11.6	3.1	0.224	–	–	–	2.4	0.7	0.56
SOD	3.8	<0.1	1	–	–	–	–	–	–
Pro	–	–	–	14.9	2	0.158	7.7	2.6	0.14
RWC	–	–	–	5.7	<0.1	1	78.8	14.8	0.04

注：表格中"–"表示该项逆境相关指标与小青菜生长指标无显著相关关系。

处理，说明小青菜在胁迫前期和中期可通过提高自身根系活力来补偿根系吸收面积的减小以适应干旱胁迫，但该适应能力随着干旱胁迫时间的延长达到极限，在胁迫后期，根系活力显著低于正常供水处理，这与马富举等[16]、陈爱萍等[17]对小麦应对干旱胁迫的根系形态生理变化的研究结果一致。此外，本研究还发现，在同一干旱等级下，与施用尿素溶液相比，施用热碱液可显著提高小青菜根系形态及根系活力(图7)，这归因于热碱液中丰富的以蛋白质和氨基酸形式存在的含氮化合物，这些有机小分子物质被植物吸收后可直接或间接参与根系代谢过程[18–20]，从而改善根系形态，扩大根系吸收面积增强根系资源获取能力，进而缓解干旱胁迫对小青菜生长造成的威胁，我们的研究结果与李敏等[21]、Wang等[22]对植物根系应对干旱胁迫的研究结果相似。此外，本试验结果表明，热碱液处理对小青菜叶片氮素吸收量与根系形态表现一致，同一干旱等级下，与施用尿素相比，施用热碱液后氮素吸收量和根系形态、根系活力均显著升高，说明热碱液可通过促进小青菜根系生长进而提高地上部氮素吸收量(图1)，Hormoz[23]也发现干旱胁迫下植物可通过改善根系形态促进氮素吸收，与我们研究结果一致，这也进一步解释了热碱液中的氨基酸等含氮化合物对小青菜抵抗干旱胁迫具有显著的积极效应，因此在干旱胁迫下，与施入尿素溶液相比，施入热碱液后小青菜生物量也有所增加。

干旱胁迫可引发植物水分代谢失衡，造成植株含水量下降，降低光合作用[24]。本试验干旱条件下，施入热碱液显著提高了小青菜叶片RWC，同时小青菜叶片光合特性也提高，说明热碱液可通过增加植物的保水能力，缓解干旱胁迫对小青菜光合系统的破坏，从而提高小青菜叶片因水分限制的气孔导度和CO_2的吸收，维持干旱胁迫下植物自身的光合碳同化能力，且在重度胁迫下起主导作用(表

2）。前人研究表明有机氮源可提高作物在干旱胁迫下的水分利用效率，进而提高作物抗旱性[25]，这与我们研究结果一致，说明热碱液中以氨基酸、蛋白质存在的有机氮对干旱胁迫下作物叶片水分及光合特性具有积极效应[26]，有利于小青菜在缺水条件下的生长。可溶性糖作为植物进行光合作用的主要产物，也是植物应对逆境的渗透调节物质之一[27]，其含量的多少代表植物抗逆性的强弱，本研究表明，干旱胁迫下施入热碱液后，小青菜叶片可溶性糖含量显著增加（图3），并与光合作用趋势保持一致，说明施入热碱液有利于小青菜功能叶在缺水条件下维持较强的光合能力，促进光合产物可溶性糖的积累，缓解逆境胁迫对其生长造成的抑制，这与前人研究结果一致[28]。Pro作为植物体内重要的渗透调节物质，施入热碱液后可进一步促进其积累（图3），从而提高了小青菜叶片细胞膜稳定性，减少干旱胁迫所带来的危害，这与曹让等[29]在棉花上发现耐旱性品种可通过提高Pro含量增强抗旱能力的研究结果相似，说明热碱液的施入可为土壤中提供丰富的氨基酸等小分子物质供小青菜吸收，并进一步控制其合成、转化及降解[30-31]，从而增加渗透性物质参与干旱胁迫的信号传导，以减少逆境胁迫所带来的危害。这与我们的研究结果一致，说明干旱条件下施入热碱液可促进植物叶片中渗透调节物质的积累，调节植物体内的渗透压，减轻干旱的危害。

植物处于逆境胁迫时，其体内ROS代谢失衡，造成膜脂过氧化，同时植物自身抗氧化保护酶系统可通过提高SOD、POD和CAT等酶活性缓解氧化损伤[32]。本试验结果发现，与正常供水处理相比，不同程度的干旱胁迫下，小青菜叶片中的SOD、POD和CAT活性均提高（图4），这与Azab等[33]对干旱胁迫下南瓜植株抗氧化酶活性的研究结果一致。施入热碱液后，不同的抗氧化酶活性表现出不同的变化趋势，经冗余分析发现在轻度和中度胁迫下主要是由CAT活性起主导作用（图8，表2），表明热碱液主要通过提高CAT活性缓解小青菜干旱胁迫。

4 结论

（1）不同程度干旱胁迫均导致小青菜生物量、氮素吸收量、根系形态及光合能力降低；与施用尿素相比，施用热碱液可改善小青菜地下根系生长，增强对水分和养分吸收利用能力，同时增强光合作用，促进小青菜生长发育，有效提高小青菜生物量和氮素吸收量，降低干旱对小青菜的负面影响。

（2）经冗余分析发现，热碱液在缓解不同程度干旱下的作用机理不同。在轻度和中度胁迫下提高CAT活性，重度胁迫下提高叶片RWC，以稳定细胞膜系统，提高小青菜对干旱胁迫逆境的适应性。

参考文献（References）：

[1] 庞鑫. 山西省农业干旱时空变化特征及其与气象因子的响应研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017. [Pang Xin. Temporal and Spatial Variation Characteristics of Agricultural Drought and Its Response to Meteorological Factors in Shanxi[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017.]

[2] 李娜, 霍治国, 钱锦霞, 等. 基于改进后相对湿润度指数的山西省气象干旱时空特征[J]. 生态学杂志, 2019, 38(7): 2249-2257. [Li Na, Huo Zhiguo, Qian Jinxia, et al. Spatiotemporal distribution of drought in Shanxi Province based on modified relative moisture index[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(7): 2249-2257.]

[3] Li Z, Zhang Y, Liu C, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi contribute to reactive oxygen species homeostasis of *Bombax ceiba* L. under drought stress[J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13(14): 991781.

[4] Park J, Park S, Kim M. Anaerobic degradation of amino acids generated from the hydrolysis of sewage sludge[J]. Environmental Technology, 2014, 35(9-12): 1133-1139.

[5] 尚明娟, 曹骏, 常智慧. 污泥对草坪草逆境生理的影响[J]. 草业科学, 2017, 34(8): 1591-1600. [Shang Mingjuan, Cao Jun, Chang Zhihui. Effect of biosolid on turf grass stress physiology[J]. Pratacultural Science, 2017, 34(8): 1591-1600.]

[6] Abdul R, Vineet S S, Jun H, et al. Opportunities and challenges in sustainable treatment and resource reuse of sewage sludge: A review[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 337(49): 616-641.

[7] Gao N, Quan C, Liu B, et al. Continuous pyrolysis of sewage sludge in a screw-feeding reactor: Products characterization and ecological risk assessment of heavy metals[J]. Energy & Fuels, 2017, 31(5): 5063-5072.

[8] Zhang X X, Huang J, Lin L, et al. Current status of technology and standards of sludge recycling in China[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 510(4): 42036.

[9] Tang Y, Xie H, Sun J, et al. Alkaline thermal hydrolysis of sewage sludge to produce high-quality liquid fertilizer rich in nitrogen-containing plant-growth-promoting nutrients and biostimulants[J]. Water Research, 2022, 211: 118036.

[10] Sigala J A, Uscola M, Oliet J A, et al. Drought tolerance and acclimation in Pinus ponderosa seedlings: The influence of nitrogen form[J]. Tree Physiology, 2020, 40(9): 1165-1177.

[11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. [Bao Shidan. Soiland Agricultural Chemistry Analysis[M]. Beijing: Chi-

na Agriculture Press, 2000.]

[12] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. [Li Hesheng. Plant Physiological and Biochemical Principles and Experimental Techniques[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.]

[13] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006. [Gao Junfeng. Experimental Guidance of Plant Physiology [M]. BeiJing: Higher Education Press, 2006.]

[14] 苏立娜, 麻冬梅, 李嘉文, 等. 外源褪黑素对盐胁迫下两种紫花苜蓿生理及光合特性的影响[J]. 草地学报, 2023, 31(3): 726-732. [Su Lina, Ma Dongmei, Li Jiawen, et al. Implications of exogenous melatonin on the physiological and photosynthetic characteristics of the seedlings of two alfalfa varieties[J]. Acta AgrestiaSinica, 2023, 31(3): 726-732.]

[15] Shoaib M, Banerjee B P, Hayden M, et al. Roots'drought adaptive traits in crop improvement[J]. Plants (Basel), 2022, 11(17): 2256.

[16] 马富举, 李丹丹, 蔡剑, 等. 干旱胁迫对小麦幼苗根系生长和叶片光合作用的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(3): 724-730. [Ma Fuju, Li Dandan, Cai Jian, et al. Responses of wheat seedlings root growth and leaf photosynthesis to drought stress[J]. Chinese Ournal of Applied Ecology, 2012, 23(3): 724-730.]

[17] 陈爱萍, 隋晓青, 王玉祥, 等. 干旱胁迫及复水对伊犁绢蒿幼苗生长及生理特性的影响[J]. 草地学报, 2020, 28(5): 1216-1225. [Chen Aiping, Sui Xiaoqing, Wang Yuxiang, et al. Effects of drought and re-watering on growth and physiological characteristics of seriphidium transiliense seedlings[J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(5): 1216-1225.]

[18] 张健, 李燕婷, 袁亮, 等. 氨基酸发酵尾液可促进樱桃番茄对水溶肥料氮素的吸收利用[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 114-121. [Zhang Jian, Li Yanting, Yuan Liang, et al. Tail liquid from amino acid fermentation could improve the uptake and utilization of water soluble fertilizer nitrogen by cherry tomato[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(1): 114-121.]

[19] 常宏, 杨洪国, 赵广东, 等. 施氮和减水对中亚热带壳斗科三种幼树生物量及其分配的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(18): 6753-6761. [Chang Hong, Yang Hongguo, Zhao Guangdong, et al. Effects of nitrogen application and rainfall exclusion on biomass and biomass allocation in saplings from three species of the Fagaceae family in the mid-subtropical region of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(18): 6753-6761.]

[20] 韩鲁杰, 冯一清, 杨秀华, 等. 有机肥化肥配施对大棚黄瓜根区土壤与根系特征的影响[J]. 园艺学报, 2022, 49(5): 1047-1059. [Han Lujie, Feng Yiqing, Yang Xiuhua, et al. Effects of combined application of organic and chemical fertilizers on root zone soil and root characteristics of cucumber in plastic greenhouse[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2022, 49(5): 1047-1059.]

[21] 李敏, 赵熙州, 王好运, 等. 干旱胁迫及外生菌根菌对马尾松幼苗根系形态及分泌物的影响[J]. 林业科学, 2022, 58(7): 63-72. [Li Min, Zhao Xizhou, Wang Haoyun, et al. Effects of drought stress and ectomycorrhizal fungi on the root morphology and exudates of *Pinus massoniana* seedlings[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2022, 58(7): 63-72.]

[22] Wang X C, Samo N, Li L, et al. Root distribution and its impacts on the drought tolerance capacity of hybrid rice in the Sichuan basin area of China[J]. Agronomy, 2019, 9(2): 79.

[23] Hormoz B. Kinetics of nutrient uptake by roots: Responses to global change[J]. New Phytologist, 2000, 147(1): 155-169.

[24] 王凯, 逄迎迎, 吕林有, 等. 杨树幼苗自然干旱过程中非结构性碳水化合物变化[J]. 生态学杂志, 2021, 40(7): 1969-1978. [Wang Kai, Pang Yingying, Lv Linyou, et al. Changes of non-structural carbohydrates of *Populus×xiaozhuanica* cv. Zhangwu seedlings during process of natural drought[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(7): 1969-1978.]

[25] 李科, 马剑. 有机无机配施对旱作冬小麦水分利用率的影响[J]. 土壤通报, 2018, 49(5): 1170-1175. [Li Ke, Ma Jian. Effects of combined application of organic and inorganic fertilization on water use efficiency of winter wheat in dryland[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49(5): 1170-1175.]

[26] 孙一梅, 田青, 吕朋, 等. 极端干旱与氮添加对半干旱沙质草地物种多样性、叶性状和生产力的影响[J]. 干旱区研究, 2020, 37(6): 1569-1579. [Sun Yimei, Tian Qing, Lv Peng, et al. Effects of extreme drought and nitrogen addition on species diversity, leaf trait, and productivity in a semiarid sandy grassland[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(6): 1569-1579.]

[27] 尚佳州, 赵瑜琦, 王卫锋, 等. 干旱对碧玉杨幼苗水氮利用与同化物分配的影响[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3): 893-899. [Shang Jiazhou, Zhao Yuqi, Wang Weifeng, et al. Response of drought on water and nitrogen utilization and carbohydrate distribution of *Populus×euramericana* 'Biyu' cuttings[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(3): 893-899.]

[28] 马玥, 苏宝玲, 韩艳刚, 等. 岳桦幼苗光合特性和非结构性碳水化合物积累对干旱胁迫的响应[J]. 应用生态学报, 2021, 32(2): 513-520. [Ma Yue, Su Baoling, Han Yangang, et al. Response of photosynthetic characteristics and non-structural carbohydrate accumulation of *Betula ermanii* seedlings to drought stress[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(2): 513-520.]

[29] 曹让, 梁宗锁, 吴洁云, 等. 干旱胁迫及复水对棉花幼苗根系氮代谢的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6): 274-280. [Cao Rang, Liang Zongsuo, Wu Jieyun, et al. Effect of progressive drying stress and the subsequent re-watering on root nitrogen metabolism in cotton seedings[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(6): 274-280.]

[30] Heinemann B, Hildebrandt T M. The role of amino acid metabolism in signaling and metabolic adaptation to stress induced energy deficiency in plants[J]. Journal of Experimental Botany, 2021, 72(13).

[31] 邓平, 吴敏, 赵英, 等. 干旱胁迫下外源钙对桂西北喀斯特地区青冈栎种子萌发的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(2): 69-79. [Deng Ping, Wu Min, Zhao Ying, et al.

Effects of exogenous calcium on seed germination of *Cyclobalanopsis glauca* in Karst area of Northwestern Guangxi under draught stress[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2020, 48(2): 69−79.]

[32] 庄晔, 刘瑞恒, 付国占, 等. 外源花青素对干旱胁迫下烤烟幼苗生长及其生理特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(6): 63−71. [Zhuang Ye, Liu Ruiheng, Fu Guozhan, et al. Effects of exogenous anthocyanins on growth and physiological characteristics of flue-cured tobacco seedlings under drought stress[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(6): 63−71.]

[33] Azab E S, Alshallash K S, Alqahtani M M, et al. Physiological, anatomical, and agronomic responses of cucurbita pepo to exogenously sprayed potassium silicate at different concentrations under varying water regimes[J]. Agronomy (Basel), 2022, 12(9): 2155.

Mechanism of sludge alkaline thermal hydrolysis liquid on the growth of *Brassica chinensis* under drought stress

BAI Ju[1,2], LIU Xiaolin[1,2,3], LI Shen[1,2], LIANG Zheming[1,2], XU Zihang[1,2], WANG Yongliang[1,2], YANG Zhiping[1,2]

(1. Key Laboratory of Saline-Alkali Soil Improvement and Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs (Subject Group), Institute of Eco-environment and Industrial Technology, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, Shanxi, China; 2. Shanxi Provincial Key Laboratory of Soil Environment and Nutrient Resources, Taiyuan 030031, Shanxi, China; 3. College of Life Sciences, Shanxi University, Taiyuan 030006, Shanxi, China)

Abstract: In recent years, there has been considerable attention given to the utilization of urban domestic sludge through the production of sludge alkaline thermal hydrolysis liquid using alkaline hot water lysis. Drought is a major abiotic stress in nature, severely limiting crop production. To effectively mitigate the adverse impact of drought stress on vegetables and explore the potential of sludge utilization, this study used *Brassica chinensis* as the research object. Different levels of drought stress were induced by creating four soil moisture gradients. Equal amounts of nitrogen from alkaline thermal hydrolysis liquid derived from sludge and urea solution were applied under different levels of drought stress to examine the resistance mechanism of the sludge-derived alkaline thermal hydrolysis liquid to drought stress. The results showed that when exposed to different drought stress conditions, the use of alkaline thermal hydrolysis liquid derived from sludge significantly improved the root length density, root surface area density, and root volume density. This enhancement improved the ability of *B. chinensis* to absorb water and nutrients from the soil and increased the leaf's relative water content, helping maintain the plant's photosynthesis process. Based on the redundancy analysis, applying alkaline thermal hydrolysis liquid to sludge could increase the leaf's relative water content and improve catalase activity, thereby alleviating the growth inhibition of *B. chinensis* induced by drought stress. In summary, the application of alkaline thermal hydrolysis liquid in vegetable production can help alleviate growth impediments caused by drought stress on leafy vegetables, provide a strategy for vegetable production in arid areas, and introduce a novel method for the safe and effective utilization of urban sludge.

Keywords: alkaline thermal hydrolysis liquid of sludge; drought stress; autioxidant enzyme activities; redundancy analysis; sludge resource utilization